
KIT QUANTUM (Q)

Luz e Fótons:

Laboratório para Alunos do Ensino Médio

Manual do professor



WOMEN SUPPORTING
WOMEN IN THE SCIENCES

Declaração de missão

A missão deste laboratório é ensinar alunos do ensino médio (idades entre 12 e 18 anos) sobre a luz por meio de experimentos relacionados à interferência e ao efeito fotoelétrico, mostrando seus comportamentos de onda e de partícula.

Índice

1. Introdução aos kits de laboratório WS2	4
1.1. Informações sobre o WS2	4
1.2. Usando este guia.....	4
1.3. Vocabulário-chave.....	5
1.4. Perguntas-chave	6
1.5. Objectivo	6
1.6. Conceitos científicos fundamentais abordados	6
1.7. Habilidades práticas.....	7
2. Contexto dos Tópicos Principais	7
2.1. O que é Luz?	7
2.2. Dualidade onda-partícula da luz	8
2.3. Como a luz é produzida?	9
3. Resumo dos Experimentos.....	10
3.1. Lista de suprimentos.....	11
3.2. Informações de segurança	11
3.3. Pré-laboratório do professor.....	11
4. Experimentos.....	12
4.1. Parte I. Medindo Objectos Finos.....	12
4.1.1. Contexto adicional.....	12
4.1.2. Questões pré-experimento	13
4.1.3. Materiais.....	14

4.1.4.	Procedimento (trabalho em grupos de 2 a 4)	14
4.1.5.	Resultados	16
4.1.6.	Análise.....	17
4.1.7.	Perguntas pós-experimento.....	19
4.2.	Parte II. Modelagem do Efeito Fotoelétrico.....	20
4.2.1.	Contexto adicional.....	20
4.2.2.	Questões pré-experimento	20
4.2.3.	Materiais.....	21
4.2.4.	Procedimento (trabalho em grupos de 2 a 4)	21
4.2.5.	Resultados	22
4.2.6.	Perguntas pós-experimento.....	23
4.3.	Parte III. Simulando o Efeito Fotoelétrico.....	24
4.3.1.	Contexto adicional.....	24
4.3.2.	Perguntas de pré-simulação	24
4.3.3.	Materiais.....	25
4.3.4.	Procedimento e Análise.....	26
4.3.5.	Perguntas pós-simulação.....	29
5.	Desafio de Design.....	30
5.1	Questões de Design	30
5.2	Esboço de Design.....	32
6.	Fontes.....	33

1. Introdução aos kits de laboratório WS2

1.1. Informações sobre o WS2

A Women Supporting Women in the Sciences (WS2), uma organização internacional que une e apoia mulheres de nível de pós-graduação e profissional e aliadas em ciência, tecnologia, engenharia e matemática (STEM), recebeu um Fundo de Inovação da American Physical Society (APS) em 2020 para formar equipes internacionais para projectar e distribuir kits de laboratório de física e ciência dos materiais de baixo custo para alunos do ensino fundamental e médio, predominantemente na África Oriental. Os kits de laboratório utilizaram recursos locais e incluíram tópicos especialmente relevantes para meninas, a fim de estimular seu interesse por disciplinas STEM. De 2020 a 2023, mais de 5.100 alunos da África Oriental em mais de 40 escolas se envolveram com nossos kits de laboratório, sendo 62% meninas.

O WS2 recebeu seu segundo Fundo de Inovação APS em 2025 para apoiar outra Iniciativa de Kits de Laboratório, desta vez com foco em tópicos quânticos. Para mais informações sobre o WS2, visite nosso site em ws2global.org.

O WS2 é patrocinado pelo Fundo de Inovação APS, pelo Fórum APS sobre Educação, pelo Centro de Pesquisa em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Northwestern e pelo Departamento de Assuntos Estudantis Multiculturais da Universidade Northwestern. O WS2 é extremamente grato aos voluntários responsáveis pelo projecto de kits de laboratório por seu árduo trabalho e aos consultores externos (SciBridge e Projekt Inspire) por sua orientação. O WS2 também agradece e reconhece o PhysicsQuest (<https://www.aps.org/initiatives/physics-education/physicsquest>) e o Quantum Explorations Student Toolbox (QuEST) pelos experimentos que serviram de base para o conteúdo do kit de laboratório.

1.2. Usando este guia

Este manual deve ser utilizado pelo professor ou facilitador do kit de laboratório e possui conteúdo semelhante ao manual do aluno, mas pode conter material adicional, a saber: Conceitos Fundamentais de Ciências Abordados, Habilidades Práticas, Resumo de Experimentos, Pré-Laboratório do Professor e Solução de Problemas. Essas seções adicionais visam fornecer ao professor o conhecimento e a base essenciais para a implementação bem-sucedida deste kit de laboratório em sala de aula. Recomenda-se que os professores deste kit de laboratório leiam o guia do início ao fim para se familiarizarem com o conteúdo antes de ensiná-lo aos alunos. Dúvidas sobre o conteúdo podem ser direcionadas a qualquer momento para

ws2global.org@gmail.com, usando o assunto "Dúvidas sobre o Conteúdo do Kit de Laboratório".

NOTAS IMPORTANTES:

- Este kit de laboratório destina-se ao uso com alunos do ensino médio (idades entre 12 e 18 anos), mas, dependendo da formação educacional específica dos alunos, o conteúdo pode precisar ser modificado pelo professor para torná-lo mais simples ou mais complexo. O professor também é incentivado a abordar o conteúdo no ritmo que melhor se adapte aos alunos; alguns alunos mais jovens podem precisar de mais tempo e atenção do professor e/ou facilitador para analisar as questões e os experimentos, enquanto alunos mais velhos podem ser mais independentes e exigir menos atenção do professor e/ou facilitador. Portanto, o conteúdo abordado, a profundidade da abordagem e o ritmo ficam a critério do professor e/ou facilitador.
- O conteúdo deste manual de kit de laboratório pode não se adequar ao currículo específico da escola em que é ensinado. Fica a critério do(s) facilitador(es) e do(s) professor(es) introduzir novos conteúdos ou pular determinadas seções que não se aplicam às suas salas de aula.
- Em certas áreas, podem ser necessárias modificações na lista de materiais, dependendo da disponibilidade de materiais na área específica em que o laboratório está sendo ministrado. Tentamos listar algumas alternativas na lista de materiais, mas entendemos que esta lista de alternativas não é exaustiva.
- Nos experimentos, os alunos são divididos em grupos de três a quatro. Se os materiais permitirem, os alunos podem ser divididos em grupos de dois.

1.3. Vocabulário-chave

- Fóton: uma partícula ou pacote quantizado de luz ou outra radiação electromagnética
- Frequência: a taxa na qual uma onda repete seu padrão
- Difração: a propagação das ondas à medida que passam através ou ao redor de um obstáculo
- Interferência: a ocorrência do encontro de duas ondas e o efeito líquido resultante da sua combinação
- Função de trabalho: a energia mínima necessária para remover um elétron da superfície de um metal

1.4. Perguntas-chave

- O que é luz? A luz é uma onda ou uma partícula?
 - *Resposta:* A luz é uma radiação electromagnética detectável pelo olho. Ela é tanto uma onda quanto uma partícula, exibindo a chamada dualidade onda-partícula.
- Quais fenômenos demonstram as propriedades ondulatórias da luz? E quanto às propriedades particulares da luz?
 - *Resposta:*
 - *Propriedades ondulatórias: interferência, difração*
 - *Propriedades semelhantes a partículas: efeito fotoeléctrico*

1.5. Objectivo

O objectivo deste manual de laboratório é permitir que os alunos conceituaiem os fundamentos da luz por meio de teoria, demonstração e experimentos. O manual apresenta aos alunos as propriedades da luz como onda, incluindo difração e interferência. Também apresentará aos alunos a quantização da luz usando o efeito fotoeléctrico.

1.6. Conceitos científicos fundamentais abordados

Este kit de laboratório apresenta o tópico da luz como onda e partícula, relevante para diversas áreas, incluindo Física, Química e Biologia, para alunos do ensino fundamental e médio. Especificamente, o kit de laboratório incentiva os alunos a refletir sobre como a luz actua como onda por meio de experimentos de difração e interferência, e como partícula por meio da analogia e simulação do efeito fotoeléctrico. Os alunos obterão as seguintes conclusões principais: (1) a luz que passa por fendas extremamente pequenas se espalha, ou difrata, e isso cria um padrão de interferência; (2) fótons de cores diferentes têm energias diferentes e, ao atingirem uma superfície metálica, podem causar a ejeção de elétrons, se tiverem energia suficiente.

1.7. Habilidades práticas

- Os alunos compreenderão as propriedades da luz e como isso leva aos diferentes fenômenos observados.
- Os alunos adquirirão experiência prática com lasers e simulação computacional.
- Os alunos conectarão conceitos a experiências cotidianas na escola e em casa (por exemplo, padrões de interferência, dispositivos que produzem e usam luz).

2. Contexto dos Tópicos Principais

2.1. O que é Luz?

A luz está em toda parte ao nosso redor. Ela vem do Sol e aparece em um quarto escuro quando você acende uma lâmpada. A pergunta básica "o que é luz?" é uma pergunta que os cientistas vêm fazendo há séculos, e a resposta não é tão básica assim. A luz é uma radiação electromagnética que pode ser detectada pelo olho humano, e a luz visível é apenas uma fração da radiação electromagnética que também inclui ondas de rádio e raios X (veja a Figura 1).

Como chegamos a essa definição? Isaac Newton propôs a teoria de que a luz é composta de diferentes partes, partículas discretas chamadas corpúsculos, em seu livro "Óptica", em 1704. Esses corpúsculos viajam em alta velocidade e sempre em linha recta. Cores diferentes são corpúsculos de tamanhos diferentes. Essa teoria de partículas da luz, no entanto, não foi capaz de explicar certos fenômenos observados, como a difração, a propagação de ondas ao passarem através ou ao redor de um obstáculo, e a interferência, a ocorrência do encontro de duas ondas e o efeito líquido

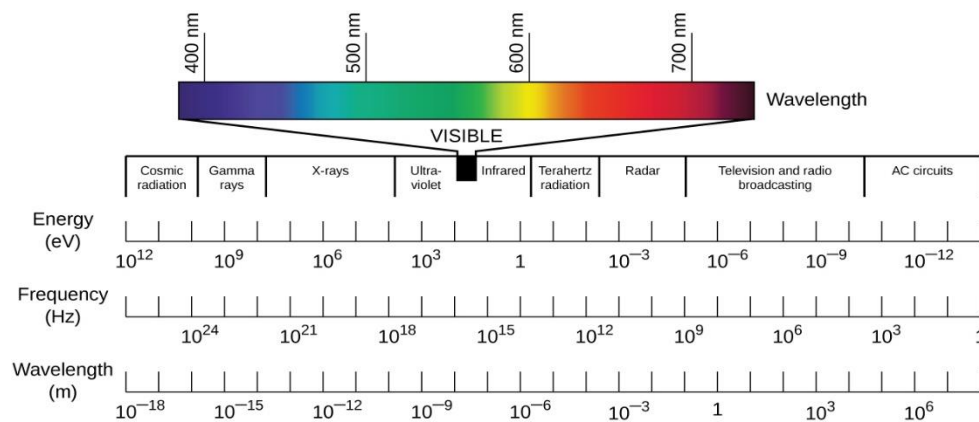


Figura 1. A luz visível é uma fatia do espectro electromagnético com comprimento de onda entre 400 e 700 nm. A energia e a frequência correspondentes da luz também são mostradas. Esta imagem, de autor desconhecido, está licenciada sob CC BY.

resultante de sua combinação. Um físico holandês, Christiaan Huygens, propôs uma teoria ondulatória da luz que foi capaz de explicar esses fenômenos. Os experimentos de Thomas Young com padrões de interferência confirmaram essa teoria e, em 1864, James Maxwell propôs a existência de ondas eletromagnéticas. Dessa proposta surgiu a ideia de que a luz era um tipo de onda eletromagnética.

2.2. Dualidade onda-partícula da luz

A teoria da luz como partícula havia sido descartada até que Albert Einstein a reviveu em sua explicação do efeito fotoelétrico, que ocorre quando a luz atinge uma superfície metálica e causa a ejeção de elétrons (ver Figura 2). A energia mínima necessária para ejetar um elétron de uma superfície metálica é conhecida como sua função trabalho. Einstein propôs que a luz viaja como pacotes discretos de energia chamados fótons. Ele incorporou a teoria de quantização de energia de Max Planck e afirmou que a energia da luz é quantizada e é diretamente proporcional à sua frequência.

$$E = hf,$$

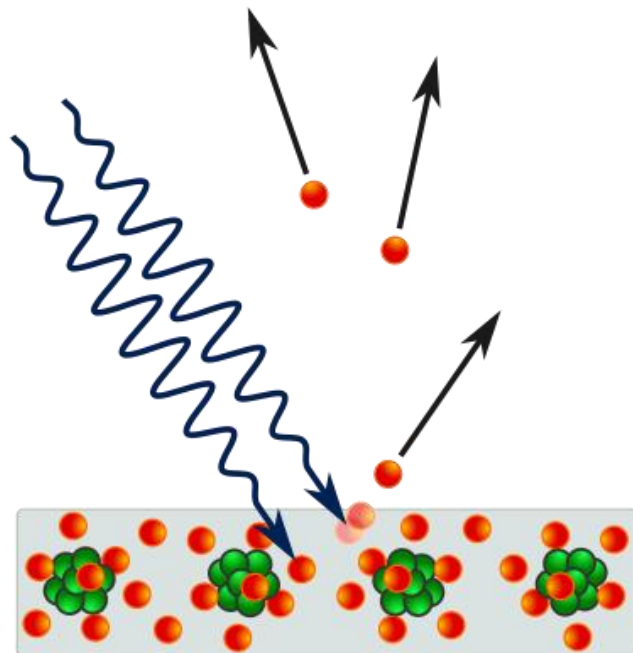


Figura 2. No efeito fotoelétrico, fótons (pacotes de luz mostrados em azul) atingem uma superfície metálica e causam a emissão de elétrons (círculos mostrados em vermelho). Esta imagem de autor desconhecido está licenciada sob CC BY-SA.

onde E é a energia do fóton, f é a frequência e h é a constante de Planck, que é igual a $\sim 6,63 \times 10^{-34}$ J-s. A frequência é a taxa na qual uma onda repete seu padrão ou, neste caso, a taxa na qual as ondas de luz repetem seu padrão. A frequência está relacionada à energia da luz, com luz de frequência mais alta correspondendo a luz de energia mais alta. A frequência da luz é inversamente proporcional ao comprimento de onda da luz, que é a distância entre dois pontos idênticos em uma onda. Assim, com a teoria quântica da luz, foi proposto que a luz é uma onda e uma partícula ao mesmo tempo, a chamada dualidade onda-partícula. Essa teoria pode explicar o comportamento ondulatório e o comportamento de partícula da luz observados na vida cotidiana e no laboratório. Experimentos, no entanto, nunca foram capazes de capturar a natureza ondulatória e de partícula da luz ao mesmo tempo até recentemente. Em 2015, cientistas da École Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL) usaram elétrons para capturar um instantâneo da luz se comportando como uma onda e um fluxo de partículas.

2.3. Como a luz é produzida?

Existem muitas maneiras de produzir luz. Na incandescência, assim como em uma lâmpada incandescente, a luz é produzida pelo aquecimento de um filamento até que ele brilhe (veja a Figura 3). A incandescência é uma tecnologia de iluminação simples e amplamente utilizada. Geralmente, na incandescência e também na combustão, que é o processo de queimar algo, a luz é produzida por átomos excitados quando elétrons se movem de um nível de energia mais alto para um nível de energia mais baixo, produzindo luz com comprimentos de onda iguais às diferenças entre os níveis de energia. A luz de uma lâmpada incandescente contém múltiplas cores (ou comprimentos de onda), o que geralmente resulta em uma luz amarelada.

Na electroluminescência, a luz é emitida quando elétrons excitados se recombinaem com sua contraparte, o buraco, em um material semicondutor quando a corrente passa por ele. Diodos emissores de luz (LEDs) (ver Figura 3) são exemplos de dispositivos semicondutores que emitem luz por electroluminescência quando elétrons e lacunas se recombinaem em uma junção pn, que é uma interface entre um material rico em elétrons (região n) e um material rico em lacunas (região p). A cor da luz emitida depende da banda proibida de energia do semicondutor, que é a distância mínima de energia entre um elétron excitado e sua lacuna. A tecnologia LED é amplamente utilizada na fabricação de lâmpadas, combinando vários LEDs em uma única lâmpada.

Em um laser (ver Figura 3), que significa amplificação de luz por emissão estimulada de radiação, os elétrons no material laser são excitados para um nível de energia mais alto. Esses elétrons excitados então retornam ao seu estado normal e liberam fótons, que podem estimular ainda mais os elétrons excitados a liberarem fótons adicionais. A luz no laser ricocheteia entre espelhos, sendo amplificada e, eventualmente, um fluxo de fótons altamente focado e coerente escapa como um feixe de laser. A cor de um laser é determinada pela lacuna de banda do material laser. Uma lacuna de banda menor resulta em luz de comprimento de onda maior (como a vermelha), e uma lacuna de banda maior resulta em luz de comprimento de onda menor (como a verde ou a azul).

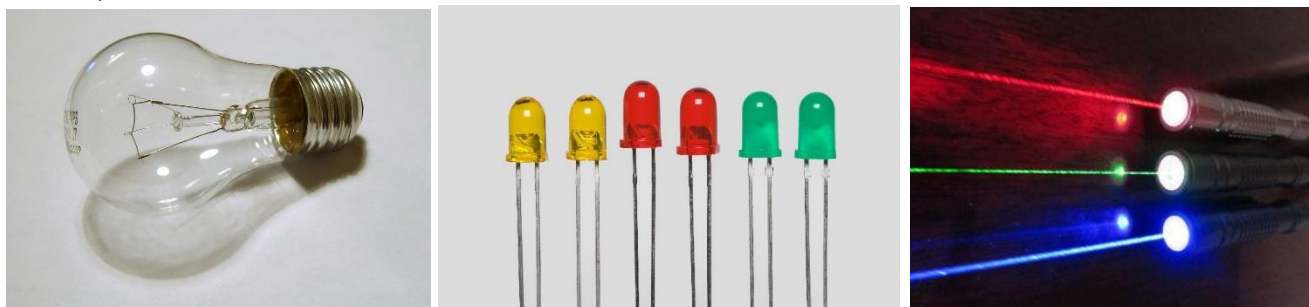


Figura 3. (Esquerda) Lâmpada incandescente típica. Esta foto, de autor desconhecido, está licenciada sob CC BY. (Centro) Exemplos de LEDs. Esta foto, de autor desconhecido, está licenciada sob CC BY-NC-ND. (Direita) Três lasers diferentes. Esta foto, de autor desconhecido, está licenciada sob CC BY-SA.

3. Resumo dos Experimentos

Este kit de laboratório consiste em dois experimentos, uma simulação computacional opcional e um desafio de design para compreender o conceito de luz e fótons. Esta investigação começará fornecendo informações básicas sobre a luz como onda e partícula, antes de demonstrar os fenômenos que surgem com base nessas descrições. Se sua escola não tiver acesso à internet/computadores, a Parte III pode ser ignorada. Os objectivos dos experimentos e do desafio de design são os seguintes:

Parte I: Demonstrar que a interferência da luz permite a medição de objectos muito finos

Parte II: Observar como fótons de diferentes energias podem ejetar elétrons no efeito fotoeléctrico por meio de uma analogia com bolinhas de gude e uma rampa

Parte III: Simular o efeito fotoeléctrico e aprender sobre a energia, frequência, comprimento de onda e intensidade da luz e seu impacto nos elétrons que são ejetados de uma superfície metálica

Desafio de Design: Projectar um dispositivo que use a luz para fazer algo útil

3.1. Lista de suprimentos

- Ponteiro laser (vermelho ou verde)
- Objectos finos (cabelo, linha de pesca)
- Ficha grande
- Papel
- Clipe(s) de fichário
- Régua ou fita métrica
- Cartolina (papel grosso)
- Canudos (ou cavilhas ou palitos de madeira)
- Marcadores coloridos (ou lápis de cor ou giz de cera)
- Bolinhas de gude
- Fita adesiva
- Tesoura

3.2. Informações de segurança

Antes de os alunos iniciarem o laboratório, levem em consideração as seguintes questões de segurança:

- Os alunos nunca devem olhar directamente para um ponto de laser, pois isso também pode causar danos permanentes aos olhos devido à intensidade do laser e à emissão como um feixe fechado.

3.3. Pré-laboratório do professor

Os professores podem organizar os materiais para os experimentos com antecedência. Para cada aluno ou grupo de 2 a 4 alunos, os materiais necessários são: 2 a 3 objectos finos (cabelo humano ou animal, linha de pesca, etc.), 1 ficha grande, 1 folha de papel comum, 1 folha de papel cartão (mais grosso), 2 cavilhas ou canudos de madeira, 2 bolinhas de gude, 2 cliques de pasta e uma caneta ou lápis. Deve haver ponteiros laser, fita adesiva, tesouras, régua e marcadores coloridos que a turma possa partilhar. Se for fazer a simulação opcional, cada grupo deve ter acesso a um computador com acesso à internet, ou o professor pode projectar a simulação para os alunos em uma tela ou quadro.

4. Experimentos

Nota para professores:

Incentive a discussão aberta e as perguntas da turma ao apresentar os experimentos.

4.1. Parte I. Medindo Objectos Finos

Esta seção é baseada na actividade Medindo a largura do seu cabelo do Quantum Explorations Student Toolbox (QuEST).

4.1.1. Contexto adicional

A luz exhibe interferência e difração, o que indica que ela possui as propriedades de uma onda. Quando a luz passa por uma abertura, ela se espalha ao redor dela (veja a Figura 4). Isso é chamado de difração. A quantidade de propagação da luz, ou o quanto ela difrata, depende do tamanho da abertura e do comprimento de onda da luz. Se o tamanho da abertura for semelhante ao comprimento de onda da luz, o efeito é mais perceptível do que se o tamanho da abertura for muito maior do que o comprimento de onda da luz. Isso cria um padrão de interferência que pode ser projectado em uma tela. Quando há interferência construtiva (as intensidades das ondas se somam), você verá um ponto brilhante. Quando há interferência destrutiva (as intensidades das ondas se cancelam), haverá um espaço escuro (veja a Figura 4).

Na configuração de fenda simples (uma abertura) descrita acima,

$$\lambda / w = s / (2d),$$

onde λ é o comprimento de onda da luz, w é a largura da fenda (neste experimento, w é também a largura do objeto, pois, de acordo com o Princípio de Babinet, a interferência proveniente de um objeto bloqueador fino é idêntica àquela proveniente de uma fenda fina); s é a distância entre os pontos escuros consecutivos no padrão de interferência (medida a partir do ponto central mais brilhante); e d é a distância da fenda até o padrão de interferência (frequentemente projectado em uma tela, parede ou folha de papel). Neste experimento, você usará a interferência da luz para determinar a largura de objectos finos, como cabelo ou linha de pesca.

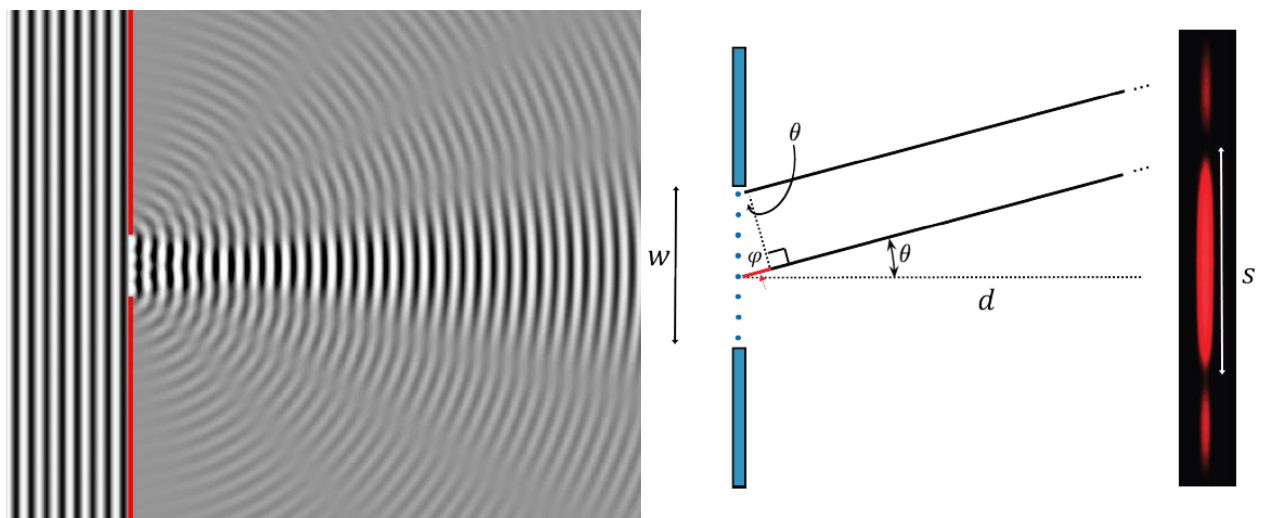


Figura 4. Em um experimento de fenda simples, a luz sofre difração ao passar por uma abertura estreita, resultando em interferência construtiva e destrutiva (à esquerda; foto de autor desconhecido, licenciada sob CC BY-SA). Padrões de interferência também são observados quando um objeto fino é posicionado diante da luz, de forma análoga ao experimento de fenda simples. Ao realizar medições na região da mancha central mais brilhante, é possível determinar a largura do objeto fino posicionado no trajeto de um laser (à direita; materiais QuEST).

4.1.2. Questões pré-experimento

1. Como se mede a largura de objectos? E quanto a objectos muito finos?
 - a. Resposta: *Você pode usar uma régua ou paquímetro para medir a largura de objectos. Se o objecto for muito fino, pode ser necessário um microscópio.*

2. Como você poderia utilizar um padrão de interferência para medir a largura da fenda em um experimento de fenda única?
 - a. Resposta: *Se você conhece o comprimento de onda da luz (λ), a distância entre pontos escuros consecutivos no padrão de interferência (medido através do ponto central mais brilhante) (s) e a distância das fendas ao padrão de interferência (d), você pode resolver a (w) usando $\lambda/w = s/(2d)$ ou $w = (2d \lambda)/(s)$.*

3. E se, em vez de uma fenda, houvesse um objeto fino posicionado no caminho da luz? Desenhe como seria essa configuração, tomando a Figura 4 como referência.
 - a. Resposta: *O aluno deve compreender que um objeto fino colocado no caminho da luz fará com que a luz sofra difração, de modo semelhante*

ao experimento da fenda simples, resultando em um padrão de interferência das ondas (como na Figura 4). Isso está de acordo com o Princípio de Babinet.

4. Qual é o comprimento de onda da luz vermelha? Da luz verde? O que há de especial no comprimento de onda da luz de um apontador laser?
- a. *Resposta: O comprimento de onda da luz vermelha está entre 620 e 750 nanômetros (o laser vermelho geralmente tem ~650 nanômetros) e o da luz verde está entre 495 e 570 nanômetros (o laser verde geralmente tem ~532 nanômetros). Os ponteiros laser são especiais porque emitem luz em um comprimento de onda específico, em vez de uma faixa mais ampla de comprimentos de onda.*

4.1.3. Materiais

- Ponteiro laser (vermelho ou verde)
- Objectos finos (cabelo, linha de pesca)
- Ficha grande
- Papel
- Fita adesiva
- Tesoura
- Clipe(s) de fichário
- Régua ou fita métrica

4.1.4. Procedimento (trabalho em grupos de 2 a 4)

Veja a Figura 5 para exemplo de configuração experimental.

1. Faça furos quadrados na ficha (um furo para cada objecto fino). Recomenda-se ter pelo menos 2 objectos finos para medição (cabelo humano, pelo de animal, linha de pesca, etc.).
2. Coloque um objecto fino sobre um furo e use fita adesiva para prendê-lo firmemente. Repita para os outros furos e objectos finos.
3. Prenda o(s) clipe(s) de fichário na parte inferior da ficha para que ela fique em pé sozinha. Coloque sobre uma mesa ou outra superfície plana.

4. A uma certa distância ($\sim 1-3$ metros) da mesa, cole o papel na parede, na mesma altura da mesa.
5. Posicione o laser o mais próximo possível do objecto fino, aponte o ponteiro laser directamente para o objecto fino e em direção ao papel colado na parede. Ajuste a posição cuidadosamente até observar um padrão de interferência no papel. Pode ser necessário aproximar ou afastar-se da parede (observação: para objectos mais grossos, pode ser necessário afastar-se da parede).
6. Marque no papel as posições de dois pontos escuros consecutivos no padrão de interferência (o ponto central mais brilhante deve estar entre os dois pontos escuros). Meça essa distância.
7. Meça a distância entre a ficha e a parede.
8. Registe as distâncias na tabela.
9. Escolha outras duas distâncias entre a ficha e a parede e repita os passos 5 a 8.
10. Repita os passos 4 a 9 para outros objectos finos.

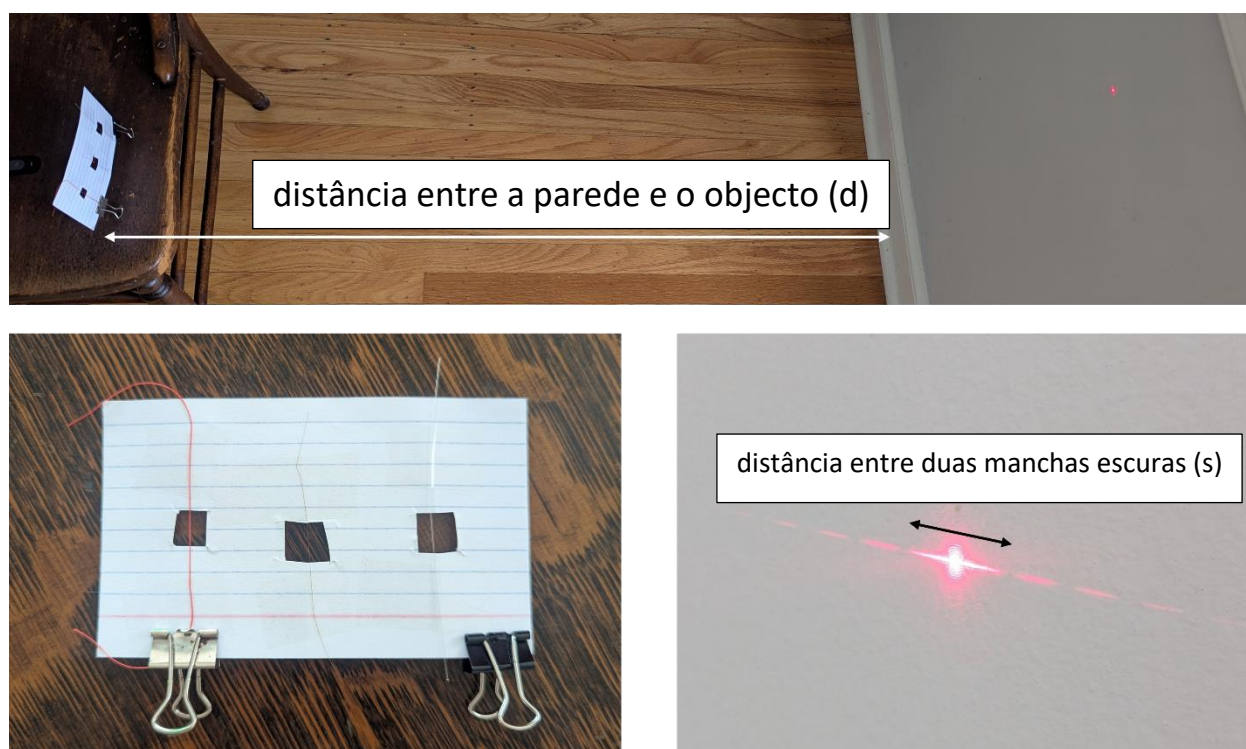


Figura 5. (Acima) Exemplo de configuração experimental para a Parte 1. O cartão de índice deve ser colocado sobre uma superfície plana, com a luz do laser voltada para a parede, com papel colado nela. A distância entre a parede e o objecto é indicada (d). (Inferior esquerdo) Exemplo de cartão de índice com três objectos finos. (Inferior direito) Exemplo de padrão de interferência com a distância entre dois pontos escuros (através do ponto central mais brilhante) indicada (s).

4.1.5. Resultados

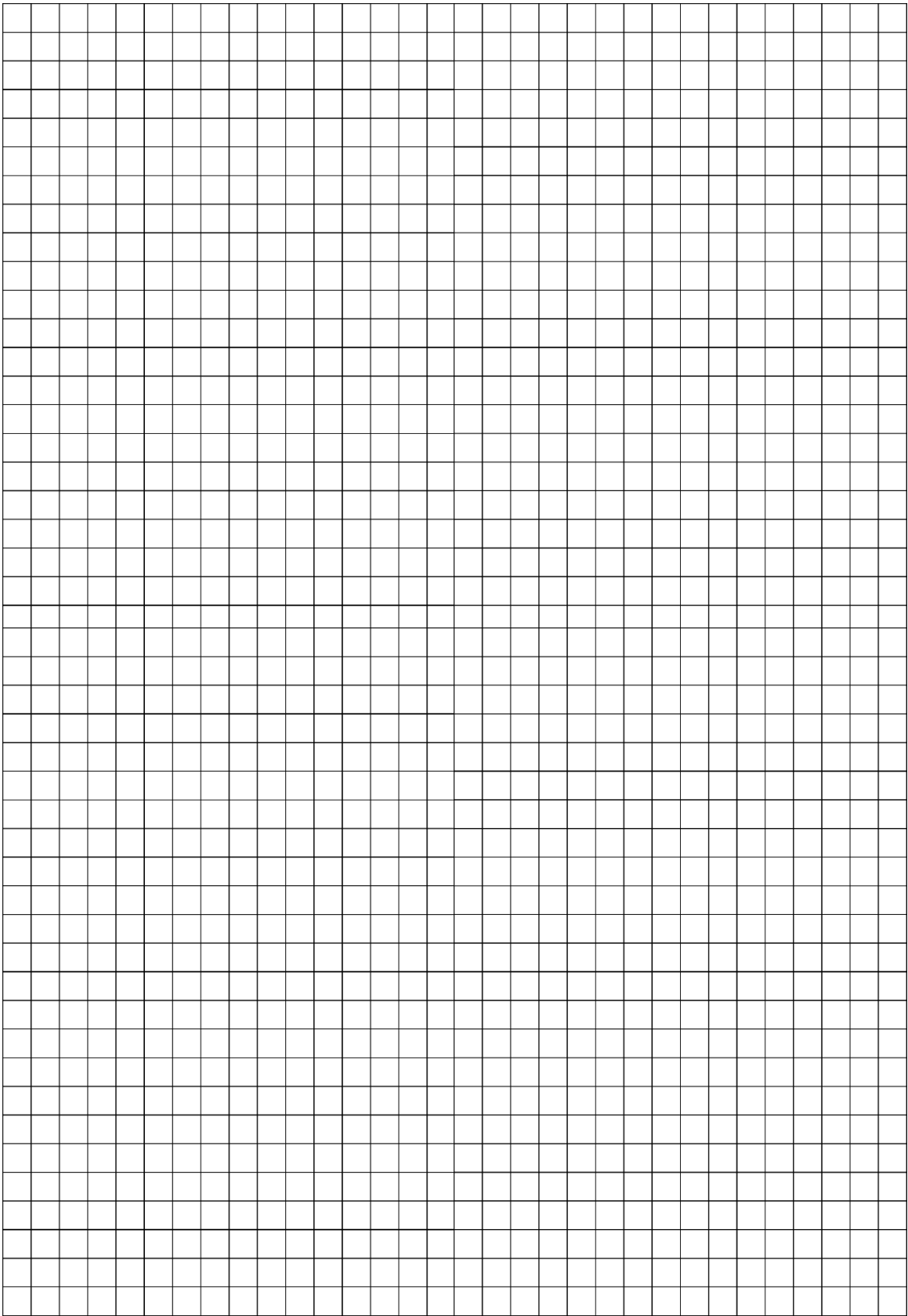
Objecto:	
Distância entre o cartão de índice e a parede	Distância entre dois pontos escuros no padrão de interferência
Objecto:	
Distância entre o cartão de índice e a parede	Distância entre dois pontos escuros no padrão de interferência
Objecto:	
Distância entre o cartão de índice e a parede	Distância entre dois pontos escuros no padrão de interferência

4.1.6. Análise

1. Reorganize a equação $\lambda/w = s/(2d)$ de modo que s esteja em um lado da equação e d esteja no outro lado, produzindo uma equação da forma $s(d)$.
 - a. Resposta: $s(d) = (2d \lambda)/w$

2. Na equação $s(d)$, você deve ver uma relação linear. Qual é a inclinação nesta equação?
 - a. Resposta: Na equação $s(d) = md$, onde m é a inclinação, a inclinação aqui é $(2\lambda)/w$.

3. Usando o papel milimetrado abaixo, trace s versus d para seus diferentes objectos finos.
 - a. Nota: Os alunos devem observar uma relação aproximadamente linear entre s e d , e a inclinação da recta pode ser encontrada na resposta acima. Cada objecto diferente cairá em uma recta diferente.



4. Para os seus diferentes conjuntos de dados, desenhe rectas que passem pelos dados e também pela origem. Encontre as inclinações das suas rectas. A partir dessas inclinações, calcule as larguras dos seus objectos. Registe esses valores na tabela abaixo.
- a. *Nota: Os alunos devem ser capazes de calcular w a partir da inclinação, reconhecendo que o comprimento de onda do laser é fixo para todos os seus experimentos.*

Objecto:	
Declive	Largura do objecto
Objecto:	
Declive	Largura do objecto
Objecto:	
Declive	Largura do objecto
Objecto:	
Declive	Largura do objecto

5. Extensão: Se você e seus colegas mediram os mesmos objectos, encontre a largura média dos objectos.
- a. *Nota: Incentive os alunos a encontrar as larguras médias dos mesmos objectos somando as larguras dos objectos e depois dividindo pelo número de valores.*

4.1.7. Perguntas pós-experimento

1. Desenhe um exemplo do padrão que você viu. Por que um padrão de interferência foi produzido?
- a. *Resposta: Um padrão de interferência foi produzido porque a luz foi difratada pelo objecto fino e as ondas interferiram de forma construtiva e destrutiva.*

2. Como você esperaria que seus dados fossem diferentes se tivesse usado uma cor diferente de apontador laser? Justifique sua resposta.
 - a. *Resposta:* Não, ainda veríamos o padrão de interferência, mas precisaríamos alterar o valor do comprimento de onda da luz em nossa inclinação para calcular a largura dos objectos.

3. Quais são as suas fontes de erro neste experimento?
 - a. *Resposta:* Nossas medições de comprimento com régua e a medição da distância entre pontos escuros consecutivos podem apresentar algum erro. Além disso, os objectos podem ter larguras ligeiramente diferentes na amostra. Incentive os alunos a apresentarem muitas ideias.

4.2. Parte II. Modelagem do Efeito Fotoelétrico

4.2.1. Contexto adicional

Em 1885, Heinrich Hertz notou que, ao incidir luz ultravioleta sobre certos metais, conseguia medir uma variação na voltagem. Ele concluiu que elétrons estavam sendo ejetados do metal (efeito fotoelétrico), mas também observou que outras frequências de luz não causavam a ejeção de elétrons. Isso não podia ser explicado pela física clássica, que definia a luz como uma onda, até que Einstein propôs que a luz também é composta por pacotes discretos de energia chamados fótons. Quando fótons colidem com elétrons na superfície do metal, há uma transferência de energia, e os elétrons podem ser ejetados do metal se os fótons contiverem energia suficiente. Os elétrons em diferentes metais precisam de diferentes quantidades de energia para se libertarem de seus átomos, e essa quantidade de energia é chamada de função trabalho. A frequência da luz que transporta essa quantidade mínima de energia é chamada de frequência limite. Nesta actividade, você construirá um modelo do efeito fotoelétrico usando bolinhas de gude e uma rampa.

4.2.2. Questões pré-experimento

1. Lembre-se do efeito fotoelétrico da Seção 2. Como você define a função trabalho de um metal?

- a. *Resposta: A função trabalho é definida como a energia mínima necessária para ejetar um elétron de uma superfície metálica.*
2. Como a função trabalho de um metal se relaciona com os elétrons ejetados no efeito fotoelétrico? Você pode fazer um esboço para fundamentar sua resposta e ilustrar o efeito fotoelétrico.
 - a. *Resposta: Incentive os alunos a fazerem um esboço semelhante ao da Figura 2. Eles podem representar diferentes cores de luz desenhando ondas com diferentes comprimentos de onda. Comprimentos de onda de luz maiores têm menor energia e menor probabilidade de ejetar um elétron.*

4.2.3. Materiais

- Papel cartão
- Canudos (ou cavilhas ou palitos de madeira)
- Marcadores coloridos (ou lápis de cor ou giz de cera)
- Bolinhas de gude
- Tesoura
- Fita adesiva

4.2.4. Procedimento (trabalho em grupos de 2 a 4)

1. Crie uma rampa que será usada para modelar o efeito fotoelétrico (veja a Figura 6). (Isso pode ter sido feito com antecedência pelo seu professor.)
 - a. Desenhe as duas linhas do meio com um lápis e corte os dois "V" a 6 cm da extremidade.
 - b. Desenhe linhas a 10 cm dos cortes em "V", começando com o vermelho (R) e continuando a cada 3 cm até obter R, O, Y, G, B, I, V.
 - c. Dobre o papel nas linhas do meio e dobre a extremidade para cima nos cortes em "V", colando as laterais próximas aos "V". Isso deve produzir uma rampa.
 - d. Use os canudos ou cavilhas e a fita adesiva para criar pernas que sustentem a rampa.
2. Coloque a bolinha de gude 1 na base da rampa.
3. Segure a bolinha de gude 2 na linha vermelha (R) da rampa e solte-a de modo que ela colida com a bolinha de gude 1.

4. Registe suas observações.
5. Repita os passos 3 e 4 com as outras linhas coloridas.

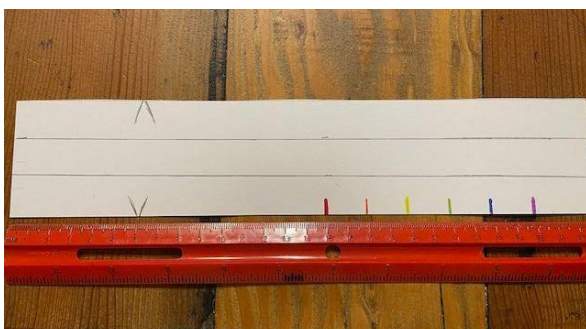
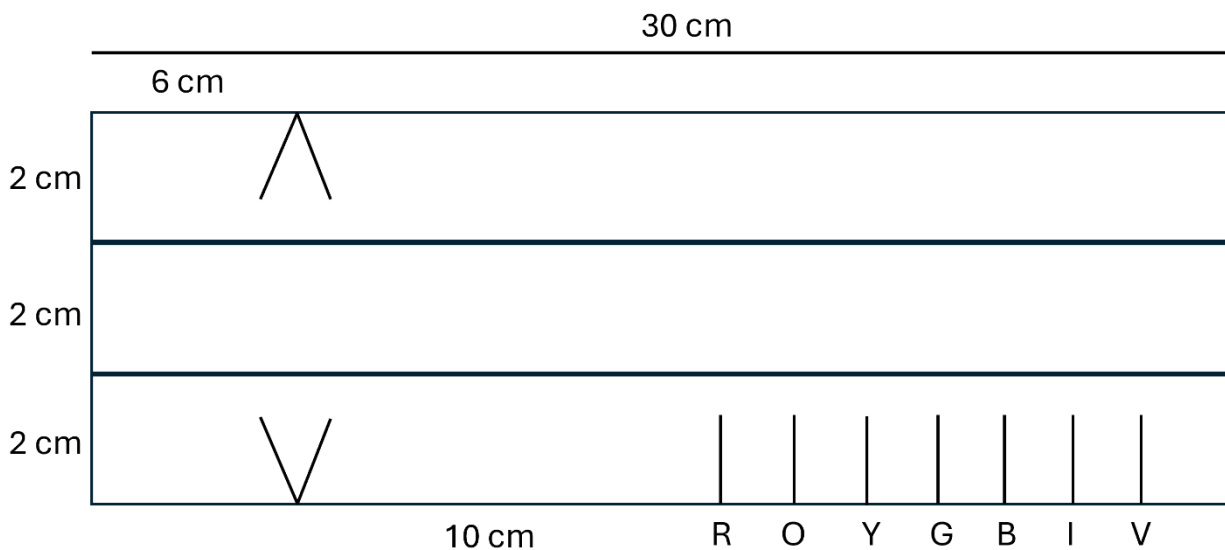


Figura 6. (Acima) Dimensões da rampa a ser construída. Observe que este desenho não está em escala e não deve ser impresso e utilizado directamente. (Abaixo à esquerda) Construção da rampa antes do corte e da aplicação da fita. (Abaixo à direita) Construção completa da rampa.

4.2.5. Resultados

Cor	Observações	A bolinha 1 foi lançada da rampa? (S/N)
Vermelha/o		
Laranja		

Amarela/o		
Verde		
Azul		
Índigo		
Violeta		

4.2.6. Perguntas pós-experimento

1. Em que linha a bolinha 1 é lançada da rampa?
 - a. Resposta: *Isso pode variar um pouco dependendo da construção da rampa.*
 - b. Pergunta de extensão: Por que você acha que a bolinha 1 conseguiu sair da rampa enquanto a bolinha 2 foi segurada nessa linha e não nas anteriores?
 - i. Resposta: *A bolinha 2 mantida na linha anterior não tinha energia suficiente para lançar a bolinha 1.*

2. O que acontece com a bolinha 1 quando você solta a bolinha 2 em "cores" mais acima na rampa? Como a altura na rampa se relaciona com a energia, o comprimento de onda e a frequência da luz daquela cor?
 - a. Resposta: *A bolinha 1 continua a ser lançada da rampa, mas com mais energia, à medida que a "cor" da bolinha 1 muda conforme ela avança na rampa. As cores mais acima na rampa são mais energéticas e têm frequências mais altas e comprimentos de onda mais curtos em comparação com as cores mais abaixo na rampa.*

3. Com base no seu conhecimento do efeito fotoelétrico:
 - a. O que a bolinha 1 representa?

- i. Resposta: fóton recebido
 - b. O que a bolinha 2 representa?
 - i. Resposta: elétron em metal
 - c. O que representa mover a bolinha 2 pela rampa?
 - i. Resposta: luz brilhante com energia superior
 - d. O que representa a primeira cor de onde a bolinha 1 é lançada da rampa?
 - i. Resposta: Isso representa a energia mínima necessária para ejetar a bolinha 2, ou a “função trabalho” da bolinha 2.
4. Como você ajustaria a rampa para modelar um metal com uma função de trabalho menor? Preveja onde a bolinha 2 deve ser liberada para lançar a bolinha 1 da rampa. Experimente!
- a. Resposta: Um metal com função de trabalho menor significa que uma bolinha de gude 1 mais abaixo na rampa (ou seja, menos energética) ejetará a bolinha 2. Isso significa que a rampa deve ser mais íngreme.

4.3. Parte III. Simulando o Efeito Fotoelétrico

4.3.1. Contexto adicional

Esta actividade opcional ilustrará o efeito fotoelétrico usando a simulação PhET gratuita:

<https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/photoelectric/latest/photoelectric.html?simulation=photoelectric>). É necessário um computador e conexão à internet.

4.3.2. Perguntas de pré-simulação

1. Qual é a relação entre o comprimento de onda da luz e sua frequência?
 - a. Resposta: Comprimento de onda e frequência são inversamente proporcionais. À medida que a frequência aumenta, o comprimento de onda diminui.
2. Qual cor de luz visível é a mais energética? Como você sabe?

- a. *Resposta: Violeta é a mais energética. Possui o menor comprimento de onda.*
3. Os fotógrafos usam luz vermelha para iluminar seus quartos escuros quando estão revelando filmes. Por que você acha que eles usam luz vermelha em vez de outra cor ou luz branca?
- a. *Resposta: A luz vermelha é a menos energética das cores, então os fotógrafos ainda conseguem enxergar no quarto escuro, mas não revelam o filme.*

4.3.3. Materiais

- Computador com conexão à internet
- Simulação PhET
(<https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/photoelectric/latest/photoelectric.html?simulation=photoelectric>)

4.3.4. Procedimento e Análise

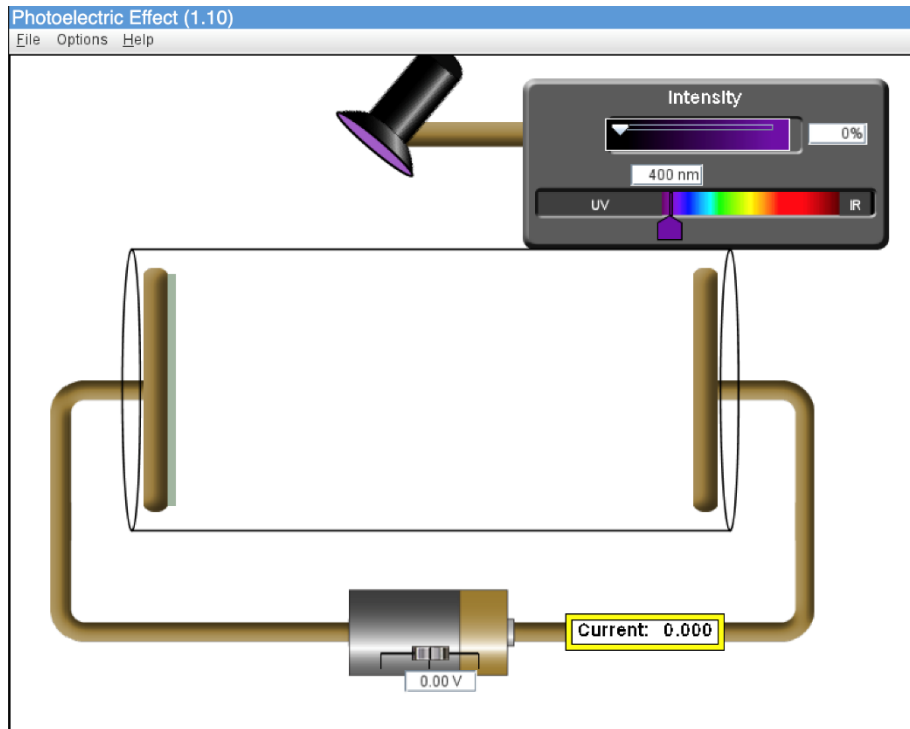
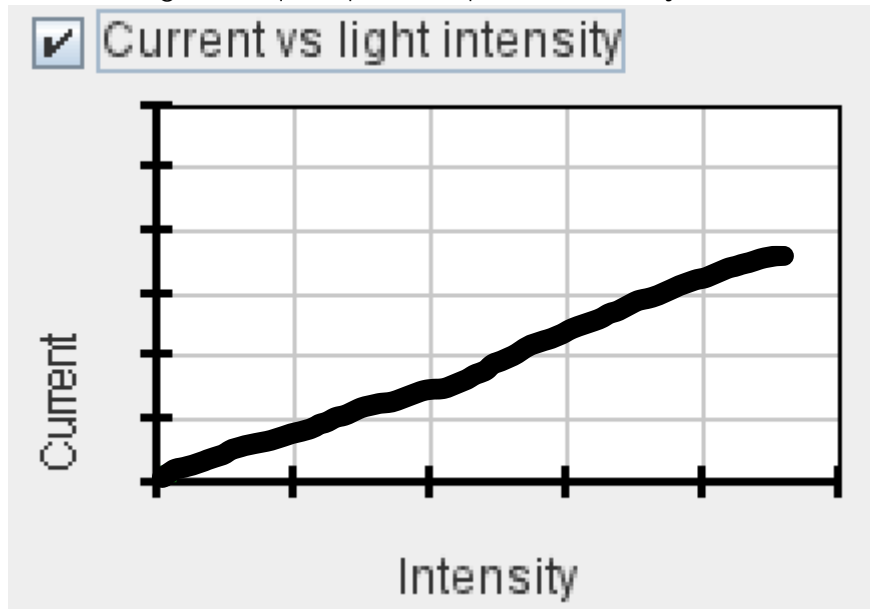


Figura 7. Tela inicial de simulação do PhET ao carregar a página da web (<https://phet.colorado.edu/sims/cheerpi/photoelectric/latest/photoelectric.html?simulation=photoelectric>).

1. Abra a simulação (o comprimento de onda inicial é definido em 400 nm e a intensidade da luz é 0%) (veja Figura 7).
2. Usando o controle deslizante Intensidade, aumente lentamente a intensidade da luz.
 - a. Descreva suas observações. O que os objectos que cruzam a tela representam?
 - i. Resposta: *Elétrons*
 - b. O que acontece com a leitura actual à medida que a intensidade da luz aumenta?
 - i. Resposta: *Aumentos actuais*

3. Abra o gráfico de corrente versus intensidade de luz marcando a caixa ao lado de "Corrente versus intensidade de luz" e ajuste a intensidade da luz.
 - a. Esboce o gráfico que aparece quando você ajusta a intensidade.

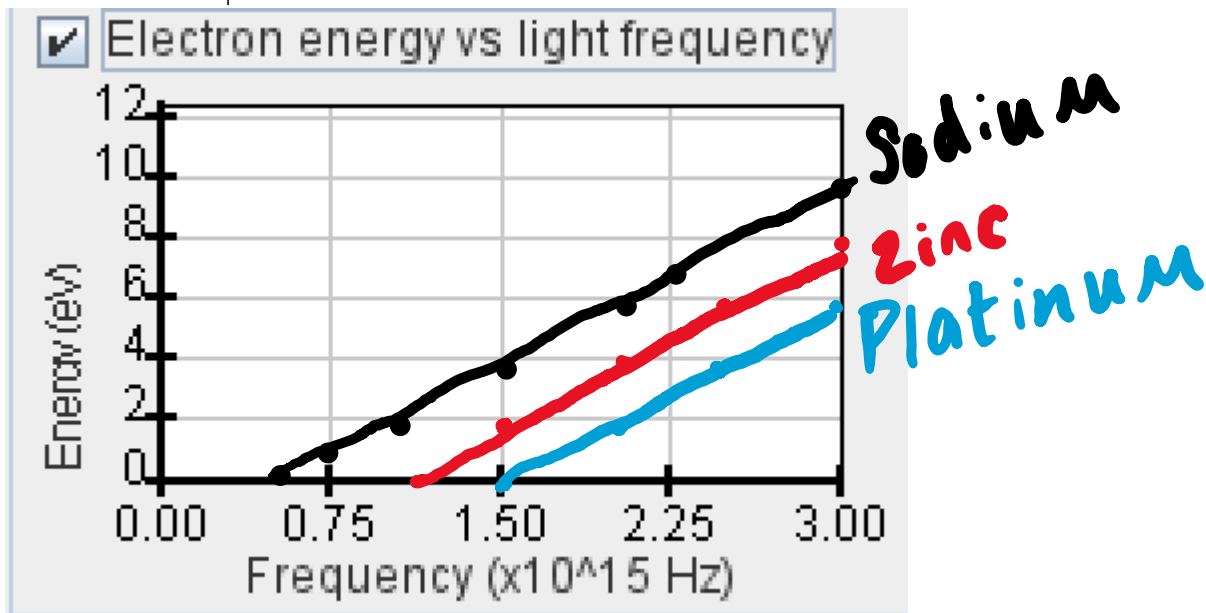


4. Defina a intensidade de volta para 0% e mova o controle deslizante de comprimento de onda para a faixa de infravermelho (IR).
5. Aumente lentamente a intensidade novamente usando o controle deslizante Intensidade.
 - a. O que você observa? Por que você acha que os resultados são diferentes na faixa de infravermelho em comparação com a faixa de UV?
 - i. *Resposta: Nenhum elétron é ejetado, independentemente da intensidade da luz. Isso ocorre porque a luz infravermelha não tem energia suficiente para ejetar elétrons em comparação com a luz ultravioleta.*
6. Ajuste a intensidade da luz para 50%.
7. Marque a caixa "Mostrar apenas elétrons de maior energia".
8. Desloque lentamente o comprimento de onda do infravermelho para o vermelho, laranja e em direção ao ultravioleta.
 - a. Em qual comprimento de onda os elétrons começam a ser ejetados do metal?
 - i. *Resposta: Sobre ~530 nm*
 - b. O que acontece à medida que você continua a diminuir o comprimento de onda (ou seja, mais em direção ao UV)?

i. Resposta: Os elétrons estão se movendo mais rápido.

9. Abra o gráfico de energia do elétron versus frequência da luz marcando a caixa ao lado de "Energia do elétron versus frequência da luz" e ajuste o comprimento de onda.

a. Esboce o gráfico que aparece conforme você ajusta o comprimento de onda. Identifique a linha Sódio



b. Este gráfico muda alguma coisa quando você ajusta a intensidade da luz? Por quê?

i. Resposta: Não, o gráfico não muda porque somente a energia da luz (frequência) impacta a energia do elétron.

c. Qual é a relação entre a energia do fóton e a frequência da luz?

i. Resposta: $E = hf$, onde h é a constante de Planck.

d. O que o intercepto x do gráfico representa?

i. Resposta: A frequência mínima necessária para ejetar um elétron, também conhecida como frequência limite (se convertida em energia, esta seria a função trabalho).

10. Altere o alvo de Sódio para Zinco navegando até o menu suspenso em "Alvo".

11. Ajuste o comprimento de onda da luz arrastando o controle deslizante.

12. Desenhe a relação entre a energia do elétron e a frequência da luz para o zinco no gráfico acima e rotule-o como Zinco.

13. Repita os passos 10 a 12 para a platina.
 - a. O que há de diferente nas 3 linhas do seu gráfico? O que há de igual?
 - i. *Resposta:* As inclinações das rectas são as mesmas, porque E é proporcional à frequência pela constante de Planck. Os interceptos x (frequências limiares) são diferentes porque são metais diferentes.

4.3.5. Perguntas pós-simulação

1. A intensidade da luz altera a energia transportada pelos fotoelétrons? Quais observações da simulação indicam isso? O que muda quando a intensidade da luz é aumentada?
 - a. *Resposta:* A intensidade da luz não altera a energia dos elétrons. Podemos ver isso no gráfico de energia do elétron versus frequência da luz à medida que ajustamos a intensidade. A corrente (número de elétrons ejetados) muda com o aumento da intensidade.
2. Qual metal alvo apresentou a maior frequência limite? Que observação da simulação ilustra isso? Qual característica do gráfico de energia versus frequência indica a frequência limite?
 - a. *Resposta:* Platina. Podemos ver isso nos gráficos de energia do elétron versus frequência da luz. A interceptação em x representa a frequência limite, pois é onde os elétrons não recebem energia adicional da luz e, em frequências maiores, recebem energia adicional da luz.
3. A energia cinética máxima de um fotoelétron pode ser encontrada usando a equação $KE = hf - \Phi$, onde h é a constante de Planck, f é a frequência da radiação incidente e Φ é a função trabalho. Usando sua compreensão da equação para uma recta ($y = mx + b$), onde m é a inclinação da recta e b é o intercepto em y , o que a inclinação dos gráficos de energia do elétron versus frequência da luz representa? Faz sentido que todos os gráficos tenham a mesma inclinação?
 - a. *Resposta:* A inclinação da recta é a constante de Planck. Faz sentido que todos os gráficos tenham a mesma inclinação, pois esta é uma constante de proporcionalidade.
4. Use os gráficos de energia do elétron versus frequência da luz para determinar a constante de Planck.

- a. *Resposta: Os alunos devem usar um de seus gráficos de energia do elétron versus frequência da luz e encontrar uma inclinação. Isso corresponde à constante de Planck.*
5. Qual característica dos gráficos indica a função trabalho do metal alvo? Como a função trabalho se relaciona com a frequência limite?
- a. *Resposta: A interceptação em y indica a função trabalho. Aqui, você pode encontrar a função trabalho convertendo a frequência limite em energia usando a constante de Planck.*
6. Na ciência, para compreender melhor conceitos que não podemos ver fisicamente ou recriar facilmente em laboratório, criamos modelos. Tanto a rampa e as bolinhas de gude (Parte II) quanto a simulação computacional (Parte III) eram modelos do efeito fotoelétrico. Como os dois modelos eram semelhantes? Como eram diferentes? Liste um pró e um contra de cada modelo.
- a. *Resposta: As respostas dos alunos variam, e a criatividade deve ser incentivada. Os modelos eram semelhantes, pois ilustravam o efeito fotoelétrico e as funções de trabalho. A diferença era que a simulação computacional nos permitiu plotar e visualizar facilmente o impacto da intensidade da luz na corrente e na energia dos elétrons.*

5. Desafio de Design

O Desafio: Projectar um dispositivo que use a luz para fazer algo útil!

Vimos em experimentos anteriores que a luz pode ser descrita como uma onda e como uma partícula, e aprendemos que existem muitas maneiras de produzi-la. Agora é hora de pensar nas maneiras pelas quais a luz é e pode ser impactante em sua vida e projectar um dispositivo (inventado ou baseado em um dispositivo real) que use a luz para fazer algo útil.

5.1 Questões de Design

1. Pense nas necessidades da sua comunidade e da sua vida. Que tipos de dispositivos são ou poderiam ser úteis para você?
2. Como as propriedades da luz poderiam ser úteis em um dispositivo? Considere os vários fenômenos que foram discutidos hoje, incluindo difração, interferência

e o efeito fotoelétrico. Pense de forma ampla sobre os diversos tipos de dispositivos e máquinas.

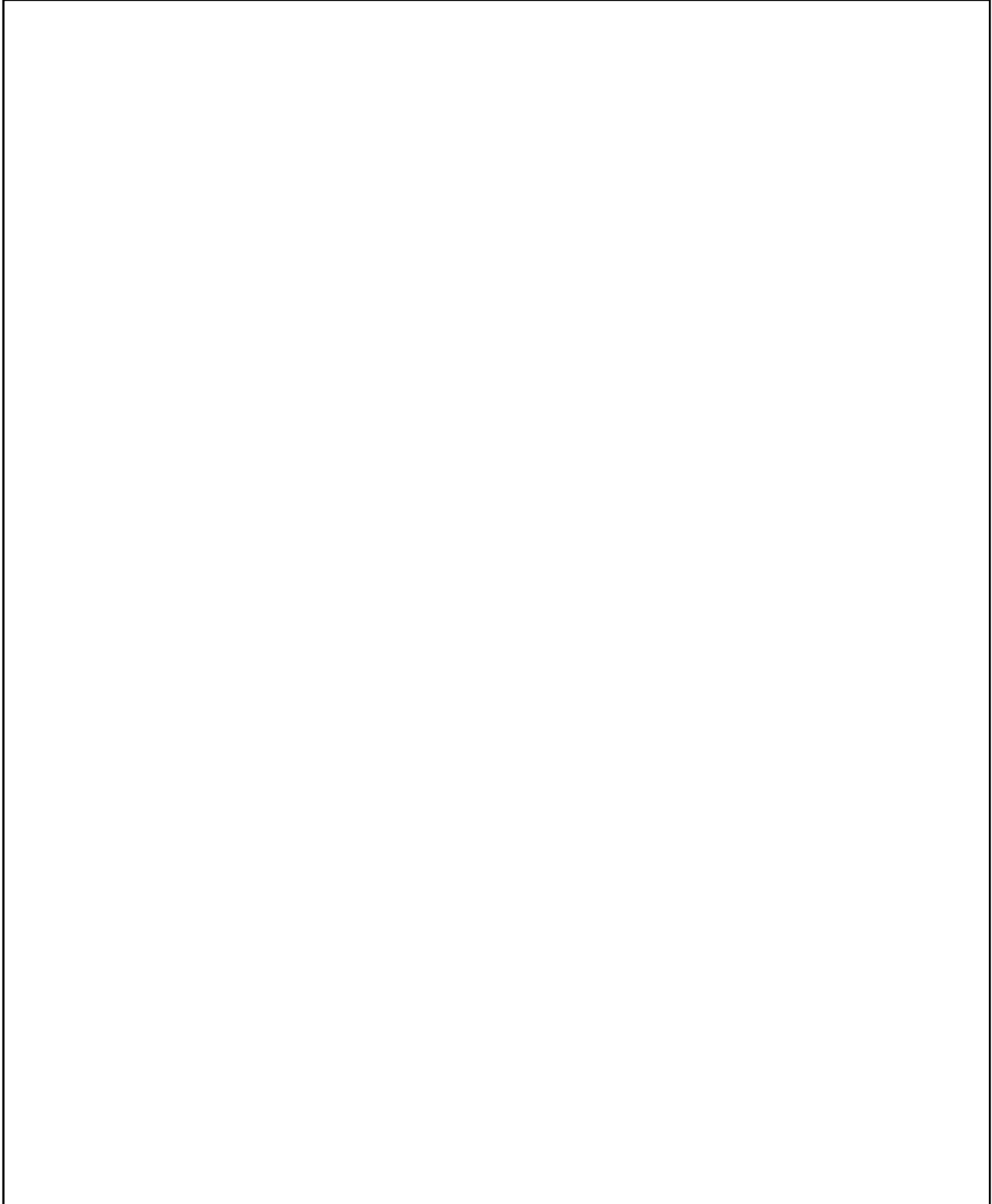
3. Como a luz será utilizada no dispositivo que você está projectando?
4. Como a energia luminosa pode ser transformada em outros tipos de energia (mecânica, eléctrica, etc.)? Como isso poderia ser utilizado no seu dispositivo?

Possíveis respostas às perguntas (incentive a discussão em sala de aula):

Os dispositivos que utilizam ou produzem luz são vastos: lanternas, células solares, câmeras, TVs e lasers são apenas alguns. Muitos desses tipos de dispositivos são ou podem ser úteis em comunidades. A luz pode ser transformada em energia eléctrica pela liberação de elétrons de um material. A luz pode fazer com que os materiais se estiquem ou dobrem. O objectivo é estimular a criatividade dos alunos e incentivar a partilha de ideias.

5.2 Esboço de Design

Esboce o design do seu dispositivo abaixo, descrevendo as maneiras pelas quais a luz será importante.

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for a design sketch. The box is currently blank.

6. Fontes

Difração e interferência:

<https://steamfest.woodlawnschool.org/activity/measuring-with-a-laser/>

<https://www.spsnational.org/file/201501/download?token=-lNzblr8>

Measuring the width of your hair. Quantum Explorations Student Toolbox (QuEST).

Efeito fotoelétrico:

<http://phy.sites.mtu.edu/RETlessonplans/the-photoelectric-effect/>

<https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/photoelectric/latest/photoelectric.html?simulation=photoelectric>

Zitzewitz, P. W.; Davids, M. (1999). *Glencoe physics: principles and problems*. Glencoe/McGraw Hill.

<https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/photoelectric/latest/photoelectric.html?simulation=photoelectric>